

А.М. Кириченко, канд. техн. наук, доц.; Ю.А. Козаченко, асп.  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Аналіз компоновок верстатного обладнання з комбінованою кінематикою

Розглянуті нові схеми верстатів з паралельною та комбінованою кінематикою для метало- та деревообробки. Показано, що верстати з комбінованою кінематикою на основі двох- і трьохкоординатних механізмів паралельної структури з додатковими традиційними осями координат є більш ефективними, ніж верстати з суто паралельною кінематикою.

**механізм паралельної структури, комбінована кінематика, компоновка, робочий простір**

В сучасному високорозвиненому індустріальному суспільстві відбувається постійна інтеграція нових технологій, що обумовлюється ринковими відносинами та підвищенням конкурентоспроможності продукції. Таким чином, конкурентна боротьба за ринки збуту верстатобудівної продукції вимагає постійного удосконалення технологічного обладнання.

Основним напрямком автоматизації багатомономенклатурного серійного виробництва є створення швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання з ЧПУ на основі механізмів паралельної структури, яке слід розглядати не як удосконалення існуючого технологічного обладнання, а як створення принципово нового обладнання для виконання майже усіх технологічних операцій (обробки, складання, випробування та вимірювання виробів), а також нових принципів конструювання сучасних верстатних систем [1].

Технологічне обладнання з паралельною кінематикою внаслідок своїх специфічних властивостей спроможне вирішити більшість технологічних задач, які ставляться сучасним багатомономенклатурним серійним виробництвом:

- високий рівень гнучкості виробництва та переналагоджування технологічного обладнання при переході на іншу номенклатуру виробів;
- реалізація надвисоких швидкостей робочих, допоміжних та установчих переміщень рухомих виконавчих органів;
- модульна конструкція технологічного обладнання;
- геометрична симетрія побудови технологічного обладнання;
- замкненість кінематичних ланцюгів, які створюють жорстку конструкцію;
- висока точність позиціонування та динамічні характеристики.

Отже, при створенні сучасного високопродуктивного технологічного обладнання для реалізації високих технологій та високошвидкісної багатокоординатної обробки необхідно орієнтуватись перш за все на використання механізмів паралельної структури, оскільки на сьогоднішній день лише такі механізми здатні забезпечити необхідний технічний рівень та високу конкурентоспроможність верстатного обладнання [2]. Поступово структури з паралельною кінематикою поширюються на обробку інших матеріалів, зокрема дерева й скла, а також на інші методи обробки.

Одним із показників, що характеризують ефективність верстатного обладнання, є коефіцієнт використання об'єму верстата – відношення загального об'єму верстата до об'єму його робочої зони. За цим показником верстати з паралельною кінематикою поки що поступаються традиційним [3]. В існуючих верстатах з паралельною кінематикою коефіцієнт використання об'єму знаходиться в межах від 150...200

(триподи) до 250 (гексаподи), тоді як у верстатах із звичайною кінематикою ця величина не перевищує 100.

Відомі переваги верстатів з традиційною й паралельною кінематикою можна об'єднати, а недоліки компенсувати, якщо одночасно використовувати відкриті й закриті кінематичні ланцюги, одержуючи верстати з комбінованою (змішаною) кінематикою, що мають на додачу до механізму паралельної структури звичайні осі координат.

Для цього встановлюють ступені свободи, необхідні для виконання верстатом конкретної задачі, і розподіляють їх відповідно між традиційною й паралельною структурами [3]. Тоді задача обробки вирішується комбінацією коротких швидких і довгих повільних рухів цих органів. В результаті короткі рухи з високою динамікою можуть бути здійснені за допомогою паралельної структури, об'єднаної із традиційною кінематикою, що дозволяє використовувати всю робочу зону верстата.

Верстати з комбінованою кінематикою можна умовно поділити на дві групи. У верстатах першої групи рух інструмента по трьох координатах забезпечується двокоординатним механізмом паралельної структури, сполученим з лінійним приводом шпинделя по координаті Z. Прикладами таких верстатів є Chiron фірми Vision, GENIUS 500 фірми Cross Huller та верстат Dyna-M. Чотирьох- та п'ятикоординатна обробка на верстатах такого типу здійснюється шляхом встановлення додаткових поворотних столів для закріплення заготовки.

У п'ятикоординатному верстаті Chiron Vision (рис. 1) за допомогою паралельної кінематики (механізм „ножиці”) здійснюються переміщення по осях X и Y, переміщення шпинделя по осі Z здійснюється за допомогою звичайного приводу. Заготовка встановлюється на керованому від ЧПУ двокоординатному поворотному столі діаметром 200 мм. Лінійні приводи по осях координат забезпечують переміщення зі швидкістю до 120 м/хв і прискоренням до 3 g, частота обертання мотор-шпинделя з водяним охолодженням досягає  $27000 \text{ хв}^{-1}$ . При лазерному контролі стану інструментів з конусом HSK40 час їхньої зміни з 24-позиційного магазину не перевищує 0,5 с при часі від стружки до стружки 1,2 с. Робочий об'єм верстата складає  $450 \times 270 \times 280 \text{ мм}$  [4].



Рисунок 1 – Верстат Vision фірми Chiron



Рисунок 2 – Верстат GENIUS 500 фірми Cross Huller

Верстат GENIUS 500 фірми Cross Hüller має двокоординатний механізм паралельної структури з лінійними напрямними для переміщення горизонтально

розміщеного шпинделя по осям  $X$  та  $Y$ , переміщення по координаті  $Z$  здійснює поворотний стіл із заготовкою. Така компоновка за рахунок зменшення рухомої маси шпиндельної головки забезпечує неперевершені технічні характеристики: максимальна швидкість переміщень робочого органу 180 м/хв, прискорення до 2,5 g при діаметрі інструмента до 230 мм і масі до 10 кг. Максимальна частота обертання шпинделя з конусом HSK63 складає 16000 хв<sup>-1</sup>, крутний момент – до 43 Н·м. Магазин містить 57 інструментів, час зміни інструмента 0,8 с, час від стружки до стружки – 2,5 с. Розміри робочої зони складають 630×630×1000 мм. Радіальна жорсткість верстата не менше 30 Н/мкм. Передбачається можливість встановлення механізму зміни супутників [5].

Верстат Dyna-M, розроблений в рамках проекту Dynamil II у Штутгартському університеті (рис. 3) побудований на основі двокоординатного W-подібного механізму зі штангами змінної довжини, привод яких здійснюється кулькогвинтовими передачами. Шпиндель рухається по координаті  $Z$  на напрямних кочення з приводом від кулькогвинтової передачі. Розміри робочої зони складають 630×630×500 мм. Швидкість координатних переміщень досягає 90 м/хв при прискоренні до 1,5 g. Максимальна частота обертання шпинделя 16000 хв<sup>-1</sup>, потужність 15 кВт, час розгону до максимальної частоти складає 1,2 с. Заготовка масою до 400 кг встановлюється на керованому від ЧПУ поворотному столі з частотою обертання до 40 хв<sup>-1</sup> [6].



Рисунок 3 – Верстат Dyna-M



Рисунок 4 – Верстат Kinematic SKM400 фірми Heckert

Верстати другої групи мають трьохкоординатний механізм паралельної структури для приводу інструмента, а інші координати – лінійні або кутові – забезпечуються традиційними засобами.

Наприклад, у верстаті мод. Kinematic SKM400 фірми Heckert (рис. 4) переміщення шпинделя з інструментом по трьох осях координат забезпечується механізмом типу трипод, а використання спеціального механізму забезпечує стабільне горизонтальне положення шпинделя. Для установки заготовок передбачений керований від ЧПУ похило-поворотний стіл з максимальною частотою обертання 100 хв<sup>-1</sup>. Таким чином, обробка корпусних деталей зі сталі й легких сплавів з розмірами сторін до 600 мм ведеться по чотирьох або п'яти осях координат, а кінематика верстата в результаті є змішаною. Внаслідок зниження маси рухомих вузлів середня швидкість переміщення шпинделя (31 кВт, 15000 хв<sup>-1</sup>) досягає 100 м/хв при прискоренні 1 g. Відпадає необхідність у традиційних вузлах і деталях (станина, стійка, напрямні і їхній захист), установка інструмента діаметром до 160 мм у шпиндель із конусом HSK63 провадиться

безпосередньо з 16-позиційного дискового магазину з маніпулятором. Всі три регульовані по довжині штанги, що служать для переміщення шпинделя по трьох осях координат, містять сервоприводи, кулькові й роликові гвинти, універсальні й обертальні шарніри, охолоджуються водою й змащуються пластичним мастилом. Передбачена установка пристрою зміни супутників і ланцюгового 60-позиційного інструментального магазину [7].

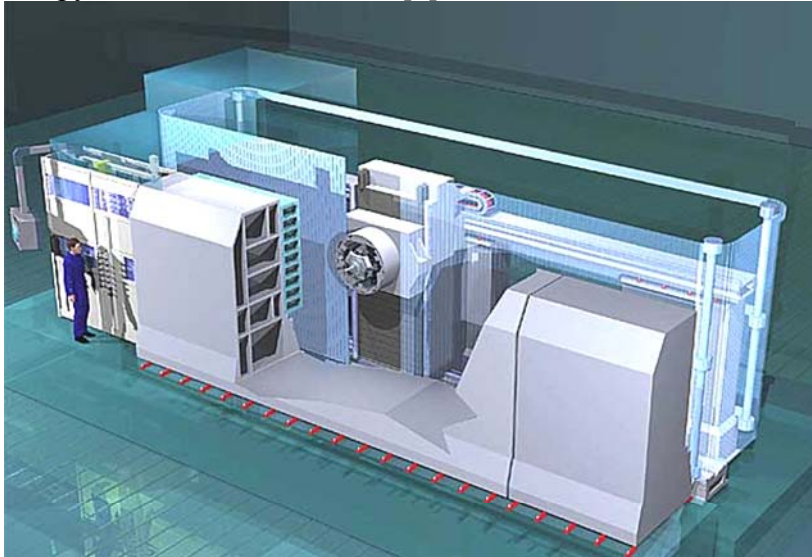


Рисунок 5 – Верстат Ecospeed фірми DS Technology



Рисунок 6 – Головка Sprint Z3

Верстат з комбінованою кінематикою мод. Ecospeed (рис. 5) фірми DS Technology, оснащений трьохкоординатною фрезерною головкою Sprint Z3 (рис. 6), дозволяє досягнути продуктивності обробки алюмінієвих сплавів  $8000 \text{ см}^3/\text{хв}$ . Головка Sprint Z3 має три керованих рухи: прямолінійне переміщення вздовж осі Z та поворотні відносно осей A та B. Ці рухи виконуються за допомогою трьох лінійних модулів, розміщених в лінійному корпусі, де троє салазок рухаються паралельно осі Z. Коли всі салазки одночасно переміщуються по осі Z, шпиндельна платформа переміщується вздовж Z без виконання поворотних рухів. Коли переміщення одних салазок накладається на переміщення інших, то додатково до подачі по осі Z відбувається нахил шпинделя відносно осей A та B. У сполученні з традиційними лінійними приводами по координатах X та Y одержується можливість обробки великих заготовок з високою продуктивністю і точністю. Завдяки використанню нової кінематичної концепції й конструкції зі сталі й легких сплавів, оптимізованої за допомогою методу кінцевих елементів, ця головка з конусом HSK63 приблизно на 50 % легше аналогічної головки п'ятикоординатного верстата. Максимальна потужність вбудованого мотор-шпинделя складає 80 кВт, частота його обертання досягає  $30000 \text{ хв}^{-1}$  при максимальному крутному моменті 46 Н·м. За допомогою швидкодіючих муфт зміну мотор-шпинделя можна провести за 2 год. Швидкість кутових переміщень головки у всіх кутових положеннях ( $\pm 45^\circ$ ) досягає 0,45 рад/с при кутовому прискоренні  $3,8 \text{ рад/с}^2$ , швидкість лінійних переміщень по осям координат Y та Z складає 50 м/хв, по осі X – 65 м/хв при прискоренні 1 g. Розміри робочої зони верстата можуть досягати  $18800 \times 2500 \times 670 \text{ мм}$  [8].

Аналіз описаних конструкцій верстатів показує, що вони, концентруючи в собі найновіші технічні досягнення в області верстатобудування, забезпечують продуктивність обробки і технічні характеристики, які практично неможливо досягнути у верстатах традиційної компоновки – максимальна швидкість прискорених рухів досягає 180 м/хв, прискорення до 3g. Точність обробки за даними фірм-виробників

складає 5 мкм, жорсткість становить не менше 30 Н/мкм. Всі верстати оснащені мотор-шпинделями, інструментальними магазинами, механізмами зміни супутників із заготовками. Конструкції станин і столів забезпечують можливість відведення великої кількості стружки, часто спеціально пристосовані для сухого різання, яке стає все більш розповсюдженим. Компонівка верстатів визначається їх технологічним призначенням, формою та розмірами робочої зони, необхідною точністю обробки.

Проаналізуємо вимоги, що ставляться до верстатів з паралельною та комбінованою кінематикою у різних галузях промисловості, при виконанні яких вони є конкурентоспроможними в порівнянні з верстатами традиційної компоновки з прямокутною системою координат. До традиційних для застосування подібних верстатів галузей автомобілебудування, авіакосмічної промисловості, виробництва інструментів, прес-форм і штампів останнім часом приєдналась і деревообробна промисловість, де паралельна кінематика дозволяє досягнути надвисокої продуктивності обробки.

Для автомобільної промисловості характерна обробка деталей з легких сплавів(в основному алюмінієвих) з приблизно однаковими габаритними розмірами в межах 500...600 мм. Для їх обробки можуть застосовуватись верстати з різними кінематичними структурами, в тому числі комбінованими, найчастіше з двома додатковими осями обертання заготовки або шпинделя. Найбільш успішними серійними верстатами такого призначення є верстати серії Tricept фірми Neos Robotics та Kinematic SKM400 фірми Heckert з комбінованою кінематикою на основі трипода, а також GENIUS 500 фірми Cross Huller з двокоординатним механізмом паралельної структури.

В авіакосмічній промисловості найбільш розповсюджені суцільні деталі складної форми значної довжини (іноді до 20 м), при обробці яких виникає необхідність зняття великої кількості матеріалу, часто до 95% об'єму заготовки. Для цього потрібні високопродуктивні високошвидкісні верстати з комбінованою кінематикою, найчастіше оснащені фрезерною головкою з паралельною кінематикою і традиційними лінійними приводами координат X та Y. Найбільш ефективним сучасним верстатом для цієї галузі можна впевнено назвати Ecospeed фірми DS Technology з трьохкоординатною головкою Sprint Z3.

В деревообробній промисловості необхідна переважно трьохкоординатна обробка з порівняно невисокою точністю, розміри робочої зони плоскої форми не перевищують 5000×1500×250 мм. Тут для одержання координатних переміщень X та Y доцільно застосовувати двокоординатні механізми з кінематикою „ножиці”, V-подібною або іншою, де лінійні напрямні розміщені перпендикулярно осі шпинделя Z. Проте успішно використовуються і верстати з суто паралельною кінематикою на основі механізмів з штангами постійної довжини типу „лінапод”, „тріаглайд”.

Деревообробний верстат з комбінованою кінематикою (рис. 7), розроблений в лабораторії Штутгартського університету [9], має в основі λ-подібний механізм паралельної структури. Для переміщення в напрямку осей X та Y використані двоє зв'язаних салазок з приводом від лінійних двигунів, які рухаються по напрямним. Паралельна структура верстата дала можливість підвищити швидкість та прискорення у напрямку осі X майже вдвічі у порівнянні з традиційними верстатами. Привод координати Z традиційний – за допомогою кулькогвинтової передачі. Верстат споряджений високошвидкісним шпинделем потужністю 21 кВт з частотою обертання 30000 хв<sup>-1</sup>. Розміри робочого простору складають приблизно 4000×1200×200 мм, орієнтовний коефіцієнт використання об'єму верстата становить 30.





Рисунок 7 – Деревообробний верстат з  $\lambda$ -кінематикою

Трьохкоординатний багатоцільовий верстат Pegasus (рис. 8) німецької фірми Reichenbacher з суто паралельною кінематикою призначений для багатобічної обробки дерев'яних панелей. Він побудований за схемою „лінапод”, оснащений шістьма нерегульованими по довжині штангами довжиною 2100 мм із композита, армованого вуглецевими волокнами. Нижні кінці цих штанг з'єднані з робочою головою, на якій установлений інструмент, що приводиться від електродвигуна потужністю 12 кВт і обертається з частотою  $40000 \text{ хв}^{-1}$ . Головка переміщується від лінійного двигуна зі швидкістю 120 м/хв і прискоренням до  $1g$ . Габарити робочого простору складають  $5000 \times 1400 \times 200 \text{ мм}$  [10]. Коефіцієнт використання об'єму верстата близько 50.

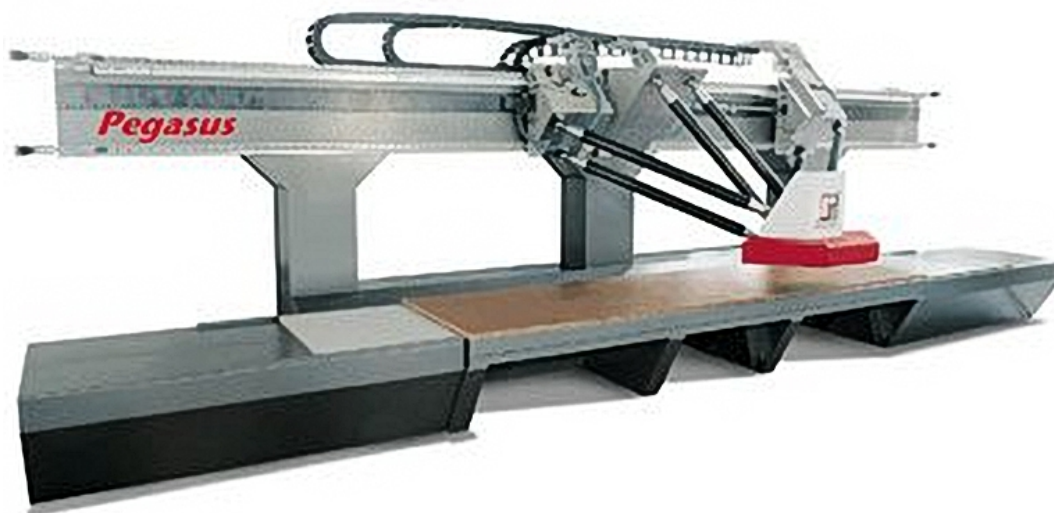


Рисунок 8 – Деревообробний верстат Pegasus

Слід відмітити дуже високу ефективність використання об'єму розглянутих деревообробних верстатів, властиву для подібних компоновок. За рахунок використання механізмів з штангами постійної довжини та лінійними напрямними досягається рекордно мала величина коефіцієнту використання робочого об'єму – в кілька разів краще, ніж у верстатів з штангами змінної довжини – гексаподів і триподів.

Порівняння розмірів і форми робочого простору верстатів з комбінованою кінематикою показує, що верстати з механізмами типу трипода мають робочий простір

приблизно кубічної форми, а робочий простір великої довжини можна одержати або використанням традиційних лінійних приводів координат X та Y (як це зроблено у верстаті Ecospeed), або застосуванням двокоординатних механізмів паралельної структури з лінійними напрямними (деревообробний верстат з  $\lambda$ -кінематикою).

Отже, на основі аналізу компоновок і технічних характеристик сучасного обладнання з паралельною та комбінованою кінематикою можна зробити наступні висновки:

1) вибір компоновки та структури верстата з паралельною кінематикою визначається областю його використання, необхідною точністю обробки та розмірами робочої зони;

2) верстати з суто паралельною кінематикою на основі механізму гексапода в більшості випадків поступаються за ефективністю верстатам з комбінованою кінематикою, які мають на додачу до механізму паралельної структури звичайні осі координат;

3) верстати з паралельною кінематикою із штангами змінної довжини мають коефіцієнт використання об'єму верстата 120...250 – в 2...3 рази гірше, ніж звичайні верстати;

4) найбільш ефективне використання об'єму верстата забезпечує комбінована кінематика на основі двокоординатних механізмів з постійною довжиною штанг та лінійними напрямними, що дозволяє зменшити коефіцієнт використання об'єму верстата до 30...50;

5) велика довжина робочого простору верстата забезпечується використанням традиційного лінійного приводу одної з координат або застосуванням механізмів паралельної структури з лінійними напрямними, розташованими у напрямку найбільшої довжини робочої зони.

## Список літератури

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Скляр Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ / Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Обработкающее оборудование нового поколения / Под ред. В.Л. Афонина. – М.: Машиностроение, 2001. – 256 с.
3. Потапов В.А. Станки с параллельной кинематикой на выставке ЕМО-2001: концепции, реальность и перспективы // Приводная техника. – 2002. – № 2. – С. 50-57.
4. <http://www.chiron.de>.
5. <http://www.cross-hueller.com>.
6. <http://www.wzl.rwth-aachen.de>.
7. <http://www.starragheckert.com>.
8. <http://www.ds-technologie.de>.
9. <http://www.isg-stuttgart.de>.
10. <http://www.reichenbacher.de>.

Рассмотрены новые схемы станков с параллельной и комбинированной кинематикой для металло- и деревообработки. Показано, что станки с комбинированной кинематикой на основе двух- и трехкоординатных механизмов параллельной структуры с дополнительными традиционными осями координат являются более эффективными, чем станки с сугубо параллельной кинематикой.

The new compositions of machine tools with parallel and combined kinematics for metal-working and woodworking are given. It is proved that machine tools with combined kinematics based on two- and three-coordinated mechanisms combined with traditional coordinate axis are usually more effective than parallel-only machine tools.